

スマートフォンに適した位置推定高精度化のための RSSI補正手法

山田 拓哉^{1,a)} 柴田 直樹² 川井 明³ 伊達 進¹ 下條 真司¹

概要: 停電した地下街からの地下街利用者の避難誘導は、被災時の人的被害の低減につながる喫緊の取り組み課題である。われわれの先行研究では、避難者のスマートフォンを用い、停電時でも避難者を迅速に避難させることのできる避難方式を提案した。提案した避難誘導方式の実現には、スマートフォンの高精度な位置推定が技術課題となる。本研究では、スマートフォンに適した高精度な位置推定手法を提案する。本研究の提案手法は、既存の位置推定手法である RSSI フィンガープリンティングに RSSI 補正手法を加えることにより、スマートフォンの高精度位置推定を行えるよう改良した手法である。実機を用いた評価実験では、提案手法による位置推定の誤差が平均 2.2 [m] 以内であることを確認した。

キーワード: 避難誘導, スマートフォン位置推定, RSSI フィンガープリンティング

RSSI Correction Method for High-accuracy Smartphone Positioning

TAKUYA YAMADA^{1,a)} NAOKI SHIBATA² AKIRA KAWAI³ SUSUMU DATE¹ SHINJI SHIMOJO¹

Abstract: Our research group has proposed an evacuation guidance system using the light of the smartphones. In order to impelment the system, high-accuracy smartphone positioning is essential. We propose an RSSI fingerprinting localization method adopting RSSI Correction for high-accuracy smartphone positioning. We evaluate the accuracy of the proposal method by an experiment. Through the evaluation, the proposal method has achieved the average error less then 2.2 [m].

Keywords: Evacuation Guidance, Smartphone Positioning, RSSI Fingerprinting

1. はじめに

地下街利用者を避難させるための方策を検討する際に無視できないのが、地震によってもたらされる停電である。停電が避難行動に対し、避難中の移動の速さの低下、避難出口の見落としといった悪影響を及ぼすことは以前から指摘されている。図 1a に通常営業時の地下街の様態を示す。この地下街が停電すると、図 1b のようにほとんど視界の無い状

況へ変わる。停電と発煙を伴う地下街災害時の避難行動実験を行った堀内らの研究 [1] は、停電及び発煙の影響によって、避難時の移動の速さが平常時と比べて 30% から 40% 程度低下すると報告している。また停電した地下街での避難実験を行った森山らの研究 [2], [3] は、停電によって視界が悪い場合、出口に気付かず素通りしやすいと報告している。

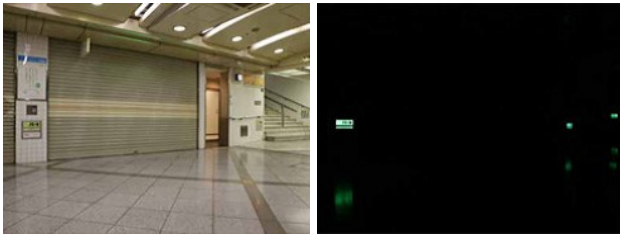
前述した問題のため、停電した地下街からの避難を助ける方策を検討し、実施しておくことは特に重要である。しかし、現状では十分な方策が実施されているとは言えない。例えば避難誘導灯は非常電源でも稼働するため、停電時の避難を助けると期待されているが、実際には避難者は誘導灯を頼りにしない。森山らの避難実験では被験者のうち避難誘導灯を頼って避難したのは全体のおよそ 20% であったことが報告されている。図 2 に示す、携帯電話の画面上に避難経

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology of
Osaka University

² 奈良先端科学技術大学院大学
Nara Institute of Science and Technology

³ 滋賀大学
Shiga University

a) yamada.takuya@ais.cmc.osaka-u.ac.jp



(a) 平常時 (b) 停電時

図 1: 地下街の様相 [4]



図 2: 神成らの提案システム [5]

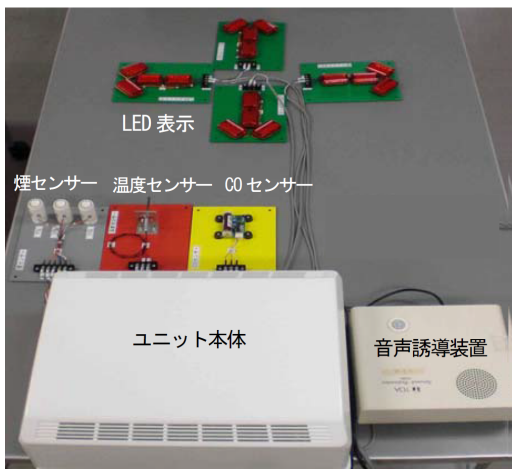


図 3: 瀧本らの提案システム [6]

路を表示する神成ら提案のシステム [5] や、図 3 に示す、避難すべき方向を指示する設備を天井に設置する瀧本ら提案のシステム [6]、Junho ら提案の AR (Argumented-Reality) を用いたスマートフォンによる GPS レスの避難誘導システム [7] など、いくつかの新しい避難誘導設備・システムも提案されているが、それらの内にも停電時の避難誘導を考慮したものはない。

この問題に着眼し、われわれの研究グループでは、停電時でも避難者を迅速に避難させることのできる誘導方式を提案した。[8]、[9] 避難誘導方式として、今日大多数の人々がスマートフォンを所有している点に着眼し、避難誘導を行うスマートフォンアプリケーションの研究開発を行っ

た。アプリケーションの動作には (1) 被災者視界確保、(2) 被災者位置推定、(3) 最寄り非常口への経路指示、の 3 つのフェーズがある。

被災者の視界確保や、スマートフォンを持たない他の被災者のために、すべてのスマートフォンの内蔵ライトを発光させ、照明の役割を果たす。次に、地下街では GPS が使えないため、各スマートフォンは受信電波強度 (RSSI: Received Signal Strength Indicator) フィンガープリンティング方式を用いて各自の位置を推定する。さらに、地図情報を参照し、スマートフォンの発光量を制御し、流れる光の帯を形成して被災者を最寄りの非常口へ向かわせる。

しかし、既存の RSSI フィンガープリンティングはスマートフォンの位置推定に適さないため、提案した避難誘導アプリの実現のためには、RSSI フィンガープリンティングをスマートフォンに適するよう改良することが必要となる。さらに、スマートフォンの機種によっては自身の送信電力を自動調整し RSSI 強度が変動するため、変動した RSSI を補正するメカニズムも必要となる。

本研究では、上述した課題を解決する、提案避難誘導方式に有効なスマートフォン位置推定手法を提案し、実機実験で提案手法の位置推定精度を検証した。既存の無線端末位置推定手法である RSSI (Received Signal Strength Indicator: 受信信号強度) フィンガープリンティングをスマートフォン位置推定に適応させ、かつ RSSI 補正計算を導入することにより、上述した技術課題を達成するよう改良した手法を提案した。

提案したスマートフォン位置推定手法の位置推定精度を、一次元上での位置推定を行う実機実験によって検証したところ、平均誤差 2.2 [m]、誤差の標準偏差が 1.7 [m] であった。これはわれわれの研究グループが提案避難誘導方式の性能を評価するコンピュータシミュレーションを実施した [8] 際に仮定した、位置推定の平均誤差及び誤差の標準偏差よりも小さい値である。

2. 停電時避難誘導方式

本節では、われわれの研究グループが提案した停電時避難誘導方式について述べる。[8]、[9] 提案方式では、避難者が持つスマートフォンを利用し、スマートフォンの内蔵ライトが発する光によって視界確保と避難経路指示の両方を行う。

2.1 提案避難誘導方式の概要

提案避難誘導方式は以下の仮定を置く。

スマートフォン: 提案方式用のアプリケーションをあらかじめインストールしている。時刻は UTC と正しく同期されているとする。地下街構内で現在位置を推定する機能を備えているとする。後述する地下街構内設備から、災害発生を知らせる信号を受信し提案方式用のアプリケーショ

ンを起動する。また、地下街構内の避難地図は地下街に進入した時に地下街構内設備から受信し保持している。

避難者: 若者から高齢者まで、運動能力の異なる数タイプの人を想定する。地下街をまばらに歩いており、一部の人はスマートフォンを携えている。

地下街構内設備: 地下街構内には構内の地図情報を備えた設備があり、地下街に進入する各スマートフォンに地図情報を送信する。また地下街構内設備は災害発生を検出する機能、もしくは災害発生の通知を公共機関などから受信する機能を持ち、自身が災害の発生を検知すると周辺のスマートフォンに災害発生を通知する。設備は避難誘導灯などを稼働させるための非常電源に接続されており、停電時にも問題なく稼働できるとする。

これらの仮定の上で提案避難誘導方式は、被災時に次の3つの動作を避難者が持つスマートフォンに行わせる。

- (1) 周辺視界確保のためのスマートフォン内蔵ライト点灯
- (2) 避難者現在位置把握のためのスマートフォン位置推定
- (3) 避難経路指示のための明滅制御

以下、それぞれの動作の詳細について述べる。

動作(1)により、停電によって視界が悪化する問題を解決する。この時、各スマートフォンの内蔵ライトは最大光量で発光するのではなく、避難者周辺を照らして視界確保するのに最低限必要な光量(弱光と呼ぶ)で発光する。

動作(2)により、避難者が地下街中のどこにいるかを把握する。さらに、スマートフォンが保持している地下街構内の地図情報を用い、推定した現在位置と地図情報を合わせることで最寄りの避難出口と出口までの経路、現在位置から出口までの距離を把握する。

動作(3)により、避難出口までの最短経路を避難者に指示する。図4に動作(3)の概要を示す。地下街構内の各地点において、最寄りの避難口までの距離に応じて発光時刻を一意に定めておく。この時、避難口に遠い地点から近い地点へと順々に発光時刻が来るよう定めておく。発光時刻が来ると、地点付近一定距離内(発光位置と呼ぶ)にあるスマートフォンは一齐に強光(スマートフォンが出力できる最大の光量)に切り替え、一定時間経過後弱光に切り替える。周辺のスマートフォンが強光を発している間は周辺の壁や床が照らされ、光の帯が形成される。発光時刻は避難口から遠い点から近い点へと順々に訪れるので、避難者から見ると光の帯が避難口に向かって進むように見え、避難者は最寄り出口までの経路を知ることができる。また避難口に十分近づいたスマートフォンのライトは盛んに点滅させ、避難口が近いことを強調し見落としを防ぐ。

2.2 提案避難誘導方式の評価

停電時避難誘導方式を提案したわれわれの先行研究[8],[9]では、提案方式が動作した模様を再現した3DCG動画、提案方式の代わりに避難者のスマホを全て強光で点灯した場

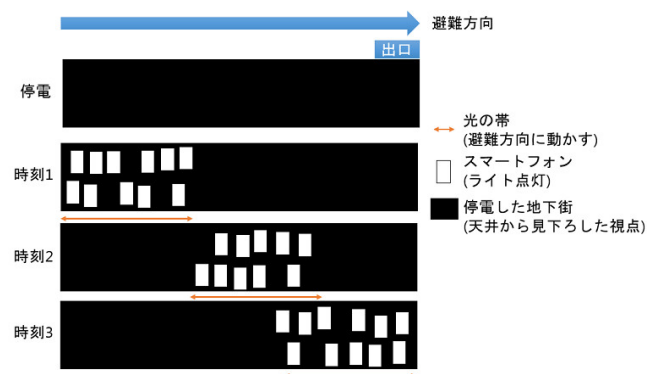


図4: 明滅制御による避難経路指示の概要 [8]

合の3DCG動画、提案方式を用いない場合の模様を再現した3DCG動画を作成し、それらを10人の被験者に視聴させアンケートを取ることで提案システムの有用性を評価した。アンケートの結果を図5と図6に示す。

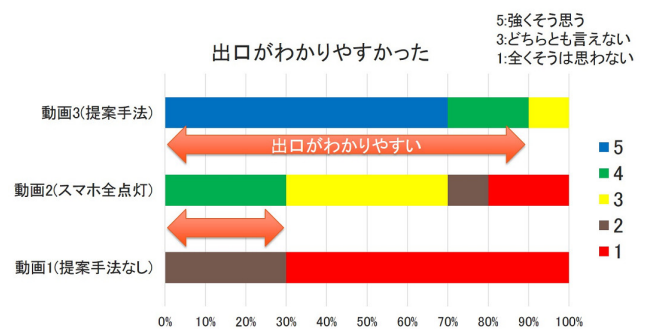


図5: アンケート結果(避難出口がわかりやすかった) [8]

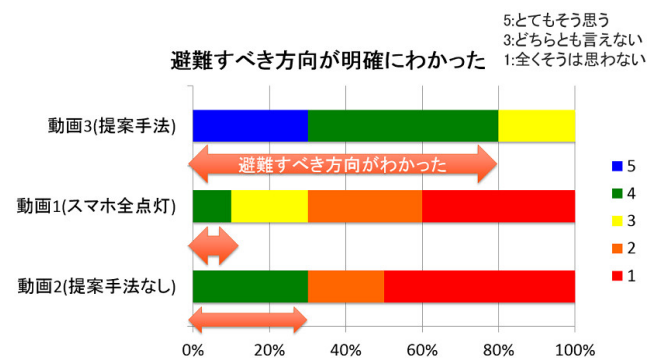


図6: アンケート結果(避難すべき方向がわかった) [8]

提案システムを用いずスマートフォンを全て強光で点灯させるだけの場合は、出口がわかりやすいと答えた被験者は20%、避難方向がわかりやすいと答えた被験者は30%であった。提案システムを用いた場合、出口がわかりやすいと答えた被験者は90%、避難方向がわかりやすいと答えた被験者は80%と大幅に増加した。よって、避難システムは避難経路をわかりやすく指示しており、かつ出口をわかりやすく指示できており有用であることが明らかになった。

3. 提案スマートフォン位置推定手法

前節で述べた、われわれの研究グループが提案した停電時避難誘導方式は実現には至っていない。提案避難誘導方式の実現に必要な、スマートフォンの高精度位置推定を行う手法が現状存在しないからである。

本研究では、スマートフォン送信電力変動問題を解決するために、計測した RSSI を補正して送信電力の影響を低減する RSSI 補正計算を考案し、RSSI 補正計算を取り入れた、スマートフォンに適した高精度位置推定手法を提案する。

3.1 先行研究で提案した位置推定手法

一般的なスマートフォン位置推定手法は GPS (Global Positioning System) を利用する手法であるが、地下街での利用が困難なことから、提案避難誘導方式の実現のために用いることはできない。そこでわれわれの先行研究 [10] では、一般的な屋内位置推定手法である RSSI フィンガープリンティングを、スマートフォンの位置推定に適するよう改良した手法を提案した。

以下、既存の RSSI フィンガープリンティングについて概説する。この手法はキャリブレーションフェーズと位置推定フェーズからなる。まず、位置推定対象範囲に数個の基地局を設置しておく。キャリブレーションフェーズでは、位置推定対象範囲内の複数の地点において、各基地局と端末間で通信を行い RSSI を計測させ、フィンガープリントと呼ばれる位置と各基地局から得られる RSSI の組み合わせを作成し、データベースにフィンガープリントを格納する。位置推定フェーズでは、現在の位置において各基地局から計測される RSSI の組み合わせと、フィンガープリントデータベースに格納されているフィンガープリントとを照合し、位置を推定する。このデータベースと計測結果との照合によって位置を推定する手法にはいくつか種類があり、なかでも一般的なものとして 1-Best と 3-Best がある。

1-Best: フィンガープリントデータベース内のフィンガープリントのうち、位置推定フェーズで計測された RSSI と最も近い RSSI を持つフィンガープリントの位置を現在位置と推定する手法である。

3-Best: フィンガープリントデータベース内のフィンガープリントのうち、位置推定フェーズで計測された RSSI と RSSI が近い順に 3 つのフィンガープリントを選び出し、その 3 つの位置を平均して推定位置を算出する手法である。いくつかの照合手法を用いた場合の位置推定精度を比較・評価した関連研究報告 [11] で、最良の位置推定精度が得られた手法である。

既存の RSSI フィンガープリンティングでは、RSSI 計測の際は基地局が信号を送信し、端末がそれを受信して RSSI を計測する。しかし、スマートフォンに RSSI を計測する機能が備わっているとは限らない。既存の RSSI フィンガー

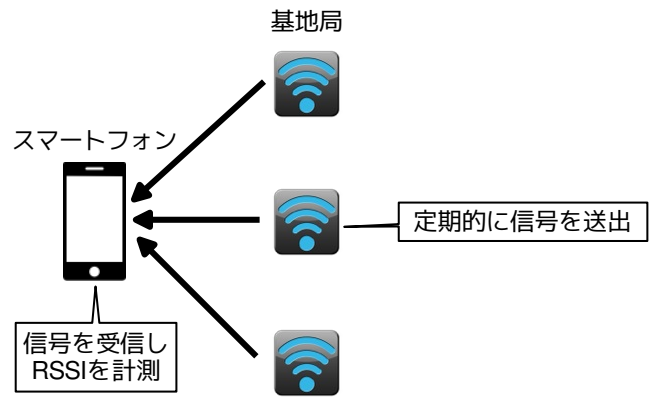


図 7: 既存 RSSI フィンガープリンティングの機種依存性

プリンティングを用いて位置推定できるのは、図 7 に示すように RSSI 計測の可能なスマートフォンのみであり、スマートフォン全般の位置推定手法としては適さない。

われわれの先行研究 [10] では、上述の問題点を考慮し、RSSI を計測する際、スマートフォンが信号を送出し、基地局が受信して RSSI を計測する、スマートフォンに適した RSSI フィンガープリンティング手法を提案した。概念図を図 8 に示す。基地局が RSSI を計測した後、基地局からスマートフォンへ RSSI を通知することで、以降は通常の RSSI フィンガープリンティングと同様に位置推定を行うことができる。基地局が信号を受信して RSSI を計測することにより、スマートフォン側は RSSI 計測の可否にかかわらず位置推定ができる、スマートフォンに適した RSSI 測位手法である。

われわれの先行研究では、スマートフォンに適した RSSI 測位手法により、被験者一名の場合は提案避難誘導方式の実現に十分な位置推定精度が得られることを報告している。しかし、複数名の被験者が同時に位置推定を行った時、位置推定精度が低下することも報告している。われわれの先行研究は、位置推定精度低下の原因はスマートフォンの送信電力変動にあると指摘している。

3.2 スマートフォン送信電力変動問題

スマートフォンが送信する信号の電力はユーザプログラムから管理することができず、スマートフォンが周辺の電波環境から判断して自動的に変更する。このため、複数台のスマートフォンが同時に通信するなどして、周辺の電波環境が変動すると、スマートフォンの送信電力も変動する。スマートフォンの送信電力が変動すれば、図 9 に示すように計測される RSSI も変動してしまい、フィンガープリンティングによる位置推定はうまく行われず位置推定精度が悪化する。

本研究では、この問題を解決するため、スマートフォン送信電力の影響を低減する RSSI 補正計算を考案した。

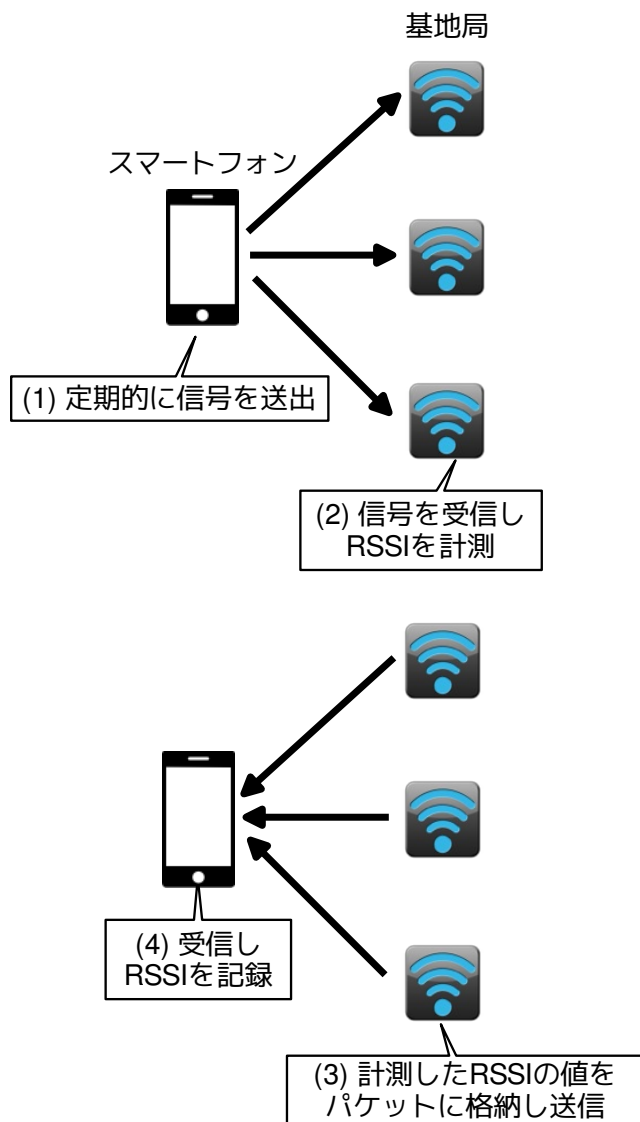


図 8: スマートフォンに適した RSSI 測定手法



図 9: 送信電力の変動に伴う RSSI の変動

3.3 RSSI 補正計算

送信電力の影響を低減するため、われわれは計測された RSSI に計測位置に基づく傾向が生じることに着目した。ここでいう傾向とは、計測位置に近い、もしくは計測位置との間に障害物がない基地局は比較的大きな RSSI を計測し、反対に計測位置から遠い、もしくは計測位置との間に多くの障害物がある基地局は比較的小さな RSSI を計測する、といったものである。

このような傾向は、送信電力の変動にかかわらず生じる。同一の packets について各基地局が計測した RSSI の平均

値を計算し、各基地局が計測した RSSI から平均値を減算すれば、送信電力の変動にかかわらず上述した傾向を取り出すことができるはずである。

そこで本研究では、式 1 に示す計算によって、RSSI から送信電力の影響を取り除く RSSI 補正計算を考案した。

$$CorrectedRSSI_i = RSSI_i - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N RSSI_j \quad (1)$$

($CorrectedRSSI_i$: 基地局 i が計測した RSSI の補正後の値, $RSSI_i$: 基地局 i が計測した RSSI, N : 基地局の総数)

3.4 提案するスマートフォン位置推定手法

本研究では、先行研究で提案した、スマートフォンに適した RSSI フィンガープリンティングに、RSSI 補正計算を組み合わせた手法を提案する。平均値の減算による RSSI 補正を RSSI 計測の度に行い、その上で RSSI フィンガープリンティングによる位置推定を行うことにより、スマートフォン送信電力の変動に影響されない位置推定が可能になると考えられる。

4. 提案位置推定手法の評価

本研究で提案するスマートフォン位置推定手法が、スマートフォンの送信電力が変動しても高精度な位置推定が可能かどうか検証するため、提案手法を実機に実装し、位置を推定する実機実験を行った。

4.1 提案手法の実装

提案手法の実装にあたり、基地局として小型の無線通信モジュールである XBee Wi-Fi S6B モジュール [12] を用いた。図 10 に基地局を示す。XBee Explorer USB を介して XBee モジュールと Raspberry PI を接続し、Raspberry PI 上で走るプログラムによって XBee モジュールの動作を制御し、基地局として動作させた。基地局の動作のアルゴリズムを Algorithm1 に示す。

スマートフォンには、iPhone 4s を用いた。iPhone は RSSI 計測の API が公開されておらず、ユーザプログラムから RSSI 計測ができない機種である。スマートフォンに、Algorithm2 に示すような動作を行うアプリケーションをインストールした。フィンガープリントとの照合手法としては前述の 3-Best を用いた。

4.2 一次元上でのスマートフォン位置推定実験

大阪大学吹田キャンパス、サイバーメディアセンター 3 階の廊下で、スマートフォンの位置を推定する実験を行った。実験環境として縦 10.0 [m]、横 1.7 [m] の範囲を用いた。実験環境の写真を図 11 に示す。実験環境の概略図を図 12 に示す。基地局を 3 台配置した。

キャリブレーションフェーズでは、スマートフォンの横



図 10: 基地局

Algorithm 1 基地局の動作

```

dict: 計測した RSSI と送信元の IP アドレスの組を格納するハッシュテーブル
1: dict  $\leftarrow$  null
2: //Thread 1 は RSSI 計測処理を行う
3: Thread 1
4: loop
5:   パケットを受信するまで待機
6:   if 受信したパケットがスマートフォンからの位置推定要求パケット then
7:     パケットの内容を記録, RSSI を計測
8:     パケットの内容から IP アドレスを読み出, RSSI と組にして dict に格納
9:   end if
10: end loop
11: end thread
12: //Thread 2 は RSSI 通知処理を行う
13: Thread 2
14: loop
15:   if dict  $\neq$  null then
16:     dict の内容をブロードキャスト
17:     dict  $\leftarrow$  null
18:   end if
19:   次の RSSI 通知タイミングまで待機
20: end loop
21: end thread

```

方向の位置は固定し, 縦方向 0.5 [m] 間隔で RSSI を計測し, フィンガープリントデータベースを作成した. 位置推定フェーズには, スマートフォンの横方向の位置はキャリブレーションフェーズと同様の位置に固定し, 縦方向に 1.0 [m] 間隔で動かしつつ, 10 点で位置推定を行った. なお位置推定フェーズでは, スマートフォン送信電力の変動を誘発するために, 位置を推定するスマートフォンの他にもう一台スマートフォンを準備し, 基地局への RSSI 問い合わせを秒間 1000 回行わせた.

本実験では, 以下の 3 通りの手法で位置推定を行った.

- RSSI 補正計算なし, 照合手法: 1-Best
- RSSI 補正計算なし, 照合手法: 3-Best

Algorithm 2 アプリケーションの動作

```

rssis: 各アンカーノードが通知してきた最新の RSSI を格納する配列, 要素数はアンカーノード数と等しい
fingerDB: フィンガープリントを格納したデータベース
fingerprint: fingerDB 内のフィンガープリント, 配列であり要素数は rssis と等しい
queue: RSSI 間のユークリッド距離と fingerprint を組として格納する優先度付きキュー, 距離をキーとして昇順に自動的に内部でソートされる
1: //Thread 1 は位置推定要求パケットのブロードキャストを行う
2: Thread 1
3: loop
4:   位置推定要求パケットをブロードキャスト
5:   次の位置推定要求パケットブロードキャストのタイミングまで待機
6: end loop
7: end thread
8: //Thread 2 は RSSI 値受信処理を行う
9: Thread 2
10: loop
11:   パケット受信を待機
12:   if 受信したパケットが RSSI 通知パケット then
13:     パケットから自らの IP アドレスと組となっている RSSI を読み出
14:     rssis  $\leftarrow$  読み出した RSSI
15:   end if
16:   if 全ての基地局から RSSI 通知を受信 then
17:     RSSI 補正計算実行
18:   end if
19: end loop
20: end thread
21: //Thread 3 は位置推定を行う
22: Thread 3
23: loop
24:   for fingerprint in fingerDB do
25:     rssis と fingerprint に含まれる RSSI 間のユークリッド距離を計算
26:   end for
27:   queue から距離の小さい順に 3 つの要素を取り出し, 各要素に含まれる fingerprint の座標情報を平均して推定位置を算出する (3-Best)
28:   次の位置推定タイミングまで待機
29: end loop
30: end thread

```

表 1: 各条件で発生した誤差

位置推定手法	最小誤差 [m]	平均誤差 [m]	最大誤差 [m]	標準偏差 [m]
補正無 1-Best	0.5	5.0	9.5	2.9
補正無 3-Best	0.0	3.1	7.0	2.2
提案手法	0.5	2.2	4.8	1.7

- 提案手法 (RSSI 補正計算あり, 照合手法: 3-Best)
それぞれの手法を用いた場合に発生した誤差のヒストグラムを, 図 13, 図 14 および図 15 に示す. また, それぞれの手法を用いた場合の最小誤差, 中央誤差, 平均誤差, 最大誤差, 誤差の標準偏差を表 1 に示す.

提案手法によって位置を推定した結果, 平均誤差は 2.2



図 11: 実験環境

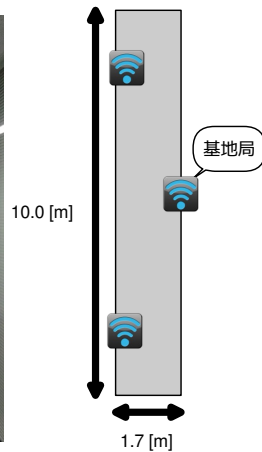


図 12: 実験環境概略図

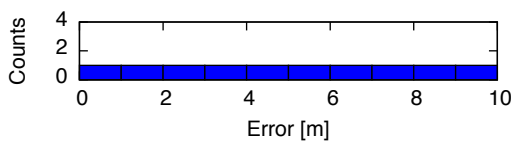


図 13: 誤差のヒストグラム (RSSI 補正計算なし, 1-Best)

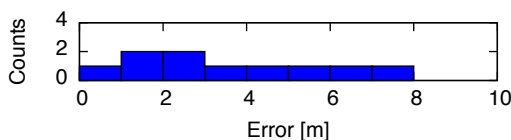


図 14: 誤差のヒストグラム (RSSI 補正計算なし, 3-Best)

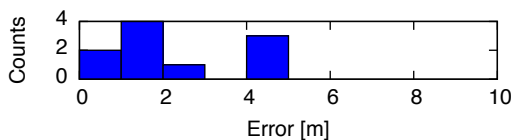


図 15: 誤差のヒストグラム (提案手法)

[m], 誤差の標準偏差は 1.7 [m] と, 提案避難誘導方式の実現に十分な位置推定精度が得られていることを確認した。また, RSSI 補正計算によって, RSSI 補正計算なしの場合と比較し位置推定精度が向上したことを確認した。

5. おわりに

スマートフォンを用いた停電時避難誘導方式の実現に必要な, スマートフォンでの利用に適した, 高精度位置推定が可能な RSSI フィンガープリンティング手法を提案した。また, 提案手法を実機に実装し, 位置推定実験によって位置推定精度を評価した。本研究で提案した RSSI 補正計算により, スマートフォンの送信電力が変動する場合でも高精度な位置推定が可能であることが明らかになった。今後は, 本研究で提案した手法の, 縦横に広がりのある範囲での位置推定精度を検証する。縦横に広がりのある範囲でも高精度位置推定が可能であれば, 提案避難誘導方式を実現し, 提

案避難誘導方式の避難誘導性能に関する被験者実験を行う予定である。

参考文献

- [1] 三郎堀内, 忠久神, 益輝室崎, 誠三淀野. 地下街防災対策に関する研究 (その 1): 停電及び発煙中の避難行動について: 建築計画. 大会学術講演梗概集. 計画系, Vol. 49, pp. 581-582, aug 1974.
- [2] 森山修治, 長谷見雄二, 小川純子, 佐野友紀, 神忠久, 蛇石貴宏. "大規模地下街における避難行動特性に関する実験研究". 日本建築学会環境系論文集, Vol. 74, No. 637, pp. 233-240, 2009.
- [3] 森山修治. "都市型地下空間の避難安全性に関する研究". 2010.
- [4] 株式会社リソズ. 蓄光避難誘導標識「しるべにすと tm」の株式会社リソズ, Nov 2015. <http://www.risozu.jp/news/2009/05/000041.html>.
- [5] 神成淳司, 吉田茂樹. "災害時における携帯端末を用いた効果的な避難誘導に関する考察". 人工知能学会 第 18 回全国大会, 人工知能学会, pp. 2G2-04, 2004.
- [6] 瀧本浩一, 三浦房紀, 松元隆博, 関原弦, 組田良則, 山本真吾. "自律分散協調による避難誘導システムの開発". 社会技術研究論文集, Vol. 8, No. 0, pp. 82-90, 2011.
- [7] Junho Ahn and Richard Han. "an indoor augmented-reality evacuation system for the smartphone using personalized pedometry". *Human-centric Computing and Information Sciences*, Vol. 2, No. 1, 2012.
- [8] 富永拓也. "スマートフォンの光を用いた地下街・大規模ビル向け避難誘導方式". 2014.
- [9] 富永拓也, 柴田直樹, 孫為華, 伊藤実. "地下街におけるスマートフォンの光を用いた避難誘導方式の提案". *DICOMO2014*, pp. 266-277, 2014.
- [10] 山田拓哉, 柴田直樹, 孫為華, 富永拓也, 下條真司. "スマートフォンに適した rssi フィンガープリンティングとそれを利用する緊急時避難誘導システムの実機性能評価". *DICOMO2015*, pp. 855-865, 2015.
- [11] Phongsak Prasithsangaree, Prashant Krishnamurthy, and Panos K Chrysanthis. "on indoor position location with wireless lans". In *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2002. The 13th IEEE International Symposium on*, Vol. 2, pp. 720-724. IEEE, 2002.
- [12] DigiInternational. "xbee wi-fi (s6b), u.fl antenna, through-hole - xb2b-wfut-001", Dec. 2014. <http://www.digi.com/products/model?mid=4260>.